

3. Мельников Н.А. Реактивная мощность в электрических сетях. — М.: Энергия, 1975. — 128 с.
4. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. Часть первая: Линейные электрические цепи. — М.: Энергия, 1970. — 592 с.
5. Пелисье Р. Энергетические системы / Под редакцией В.А. Веникова, перевод с французского. — М.: Высшая школа, 1982. — 568 с.

6. Шульц Ю. Электроизмерительная техника: 1000 понятий для практиков / Справочник, перевод с немецкого. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 288 с.
7. Головкин П.И. Энергосистема и потребители электрической энергии. — М.: Энергия, 1979. — 368 с.
8. Гінайло В.О., Танкевич Є.М. Мікропроцесорна технологія обліку електроенергії // Енергетика та ринок. — 1999. — № 1(9)-2(10). — С. 41-46.

© Щербина Ю.В., Банін Д.Б., Голота А.Д., Банін М.Д., Гнатовський А.В., 2003



## Автоматизированный электропривод турбокомпрессора на газоперекачивающей станции

➤ **ИСАКОВ В.Н.**, докт. техн. наук, **СТЯЖКИН В.П.**, канд. техн. наук, **АКИНИН К.П.**, канд. техн. наук, **ИСАКОВ Г.В.**, инж., **ИСАКОВ А.Н.**, инж., **КРАСНОШАПКА Н.Д.**, инж., Институт электродинамики НАН Украины, **ДЕМЧЕНКО Н.А.**, инж., **БЕККЕР М.В.**, инж., ГК "Укртрансгаз"

**Н**а предприятиях нефтяной, газовой, химической, горнорудной промышленности эксплуатируются турбокомпрессоры, электроприводы которых характеризуются номинальной мощностью единицы-десятки мегаватт и номинальной частотой вращения более 3000 об./мин. Технологические требования к турбокомпрессорам на таких предприятиях, как правило, определяют необходимость регулирования частоты вращения приводного двигателя, т.е. применения регулируемого электропривода. В частности, на газоперекачивающей станции такая необходимость вызывается изменением (суточным, годовым) потребления газа и изменениями его параметров (температура, плотность, давление).

Развитие промышленного электропривода большой мощности продвигается в направлениях разработки высокоскоростных двигателей специальной конструкции (т.н. *HS*-двигатели) для частотного регулирования и создания многоуровневых преобразователей частоты с *IGBT* приборами, рассчитанными на большие токи и напряжения. Кроме того, при проектировании новых промышленных электроприводов укрепляется тенденция разработки специальных электродвигателей, интегрированных с элементами конструкции приводимого механизма, а также специализированных преобразователей частоты, синтезированных с учетом параметров этих двигателей.

Опыт ведущих фирм (*ABB*, *Siemens*) и научных центров в Западной и Восточной Европе указывает на то, что в настоящее время на большую мощность технически целесообразно и экономически выгодно применение электроприводов турбокомпрессоров по системе статический преобразователь частоты - син-

хронная машина (ПЧ - СМ), работающая в режиме вентильного двигателя.

В системах ПЧ - СМ до сих пор применялись регулятор преобразователя частоты (РПЧ) и регулятор возбуждения (РВ), которые проектировались отдельно от синхронной машины, при этом специальные требования приводимого механизма, в частности турбокомпрессора, выполнялись благодаря применению дополнительных управляющих вычислительных комплексов. Такое "отчуждение" составляющих автоматизированного электропривода турбокомпрессора не позволяет на данном этапе развития рассматривать систему ПЧ - СМ как законченный тип промышленного электропривода.

Вопросы формулирования специальных требований к РПЧ и РВ при их совместной работе с синхронной машиной в составе электропривода турбокомпрессора на газоперекачивающей станции, задачи рационального проектирования системы автоматического управления электроприводом турбокомпрессора на базе современных средств и способов управления являются актуальными, и решение их необходимо при модернизации действующих и проектировании новых станций.

Исследования, проводимые в Институте электродинамики НАН Украины, позволяют приблизиться к решению этих задач.

В качестве объекта исследований взята система автоматизированного электропривода турбокомпрессора на действующей газоперекачивающей станции. Электропривод является составной частью агрегата для транспортировки газа типа 650-21-2.

Электропривод имеет следующие номинальные характеристики:

- номинальная мощность,  
кВт — 25000;

- номинальное число  
оборотов, об./мин — 3700;

- номинальный момент,  
Н·м — 64599;

- рабочий диапазон регу-  
лирования числа оборотов,  
об./мин — 2600-3900;

- напряжение питающей  
сети, кВ —  $115 \pm 10\%$ ;

- частота сети, Гц —  $50 \pm 1$ ;

- коэффициент мощности  
в номинальной точке (без  
компенсации) — 0.85;

- коэффициент мощности с  
детерминированной нагрузкой  
в рабочем диапазоне скоростей  
2600-3300 об./мин (компенса-  
ционная станция мощностью  
12000 кВАр) — 0.94;

- коэффициент мощности  
с детерминированной нагруз-  
кой в рабочем диапазоне ско-  
ростей 3300-3900 об./мин (компенса-  
ционная станция мощностью  
12000 кВАр) — 0.98;

- КПД (минимальное значение) — 0.935.

Предметом разработки являются новые регуляторы РПЧ и РВ, стыкуемые с существующей силовой частью электропривода, но выполненные на принципиально новой основе — с использованием программируемых микроконтроллеров (в “старом” варианте регуляторы РПЧ и РВ выполнены на базе аналогово-цифровой техники). Кроме того, при разработке новых регуляторов РПЧ и РВ должны учитываться как традиционные технические требования к автоматизированной системе управления электроприводом по системе ПЧ - СМ, так и технические требования, определенные практикой использования этой системы в электроприводе турбокомпрессора на газоперекачивающей станции.

#### Состав и особенности работы автоматизированного электропривода турбокомпрессора

В состав электропривода турбокомпрессора, выполненного по системе ПЧ - СМ, входят: понижающий четырехобмоточный трансформатор Т1, двойной тиристорный преобразователь частоты ПЧ, синхронный электродвигатель СМ и управляемый выпрямитель возбуждения УВВ с питающим трансформатором Т2 (рис. 1).

Статорная обмотка электродвигателя СМ выполнена в виде двух трехфазных обмоток, соединенных в звезду. Обмотки взаимно сдвинуты на 30 электрических градусов. Каждая обмотка питается от высоковольтного преобразователя частоты с промежуточным звеном постоянного тока. Преобразователь частоты состоит из входного сетевого преобразователя

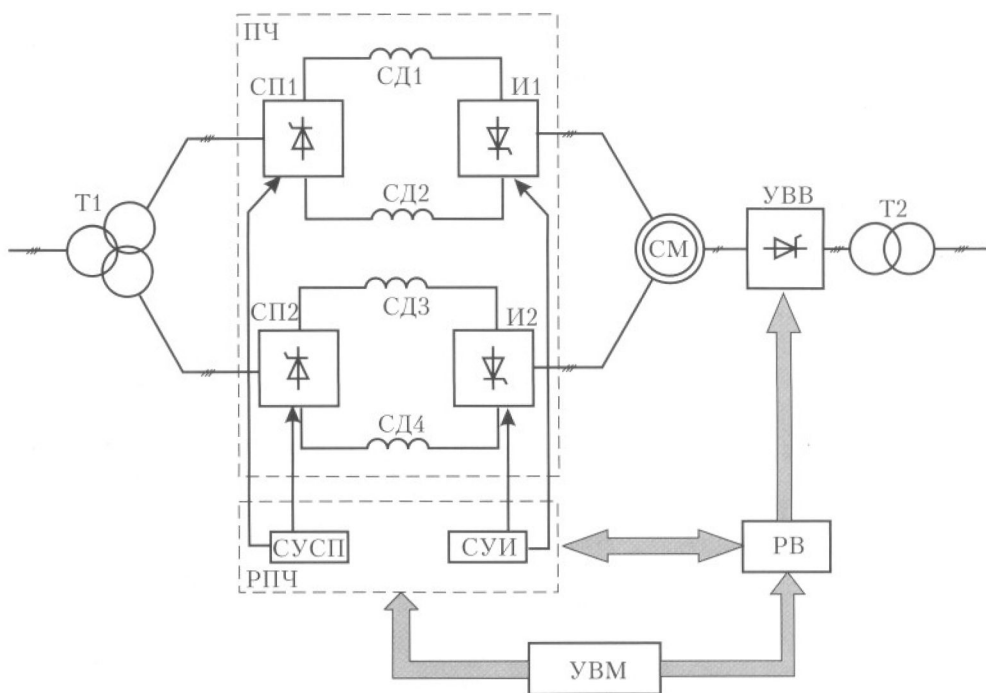


Рис.1. Структурная схема автоматизированного электропривода турбокомпрессора

СП1 (СП2), промежуточного звена постоянного тока со сглаживающими дросселями СД1, СД2 (СД3, СД4) и зависимого инвертора И1 (И2) со стороны двигателя. Обои преобразователями частоты управляет общий регулятор РПЧ.

Каждый из инверторов И1, И2 работает в режиме инвертора тока с естественной коммутацией вентилей и формирует вентильный коллектор 3-го типа, при этом синхронный двигатель СМ работает как вентильная машина. Система управления инвертором (СУИ) является составной частью регулятора РПЧ и задает фазовый угол  $\phi_1$  между первыми гармониками напряжения и тока статора двигателя СМ, непосредственно с зажимов которого берется напряжение синхронизации для СУИ. Фазовый угол  $\phi_1$  является независимым параметром управления в СУИ, поэтому в этой системе простыми средствами обеспечивается относительное постоянство напряжения на зажимах двигателя при изменении его нагрузки.

Каждый из сетевых преобразователей СП1, СП2 может работать в выпрямительном и инверторном режимах, выбор которых определяет регулятор РПЧ. Система управления сетевым преобразователем (СУСП) является составной частью регулятора РПЧ и задает угол управления тиристорами СП, обеспечивая требуемую величину тока в промежуточном звене постоянного тока.

Дроссели СД1-СД4 сглаживают ток в цепи постоянного тока и препятствуют недопустимо быстрому его изменениям.

Четырехобмоточный трансформатор Т1 осуществляет питание сетевых преобразователей СП1, СП2

и работает в 12-пульсном режиме относительно питающей сети, что способствует уменьшению содержания высших гармоник в питающем токе.

Выпрямитель возбуждения УВВ обеспечивает требуемую величину тока возбуждения двигателя и управляется от регулятора возбуждения РВ.

Электромагнитный момент  $M_E$  синхронного двигателя СМ пропорционален величине магнитного потока статора  $\Phi_S$ , величине магнитного потока ротора  $\Phi_R$  и углу  $\alpha_\phi$  между векторами мгновенных значений потоков  $\Phi_S$  и  $\Phi_R$ :

$$M_E \approx \Phi_S \cdot \Phi_R \cdot \sin \alpha_\phi. \quad (1)$$

Неравномерное вращение магнитного поля  $\Phi_S$ , создаваемого одной статорной обмоткой, относительно поля  $\Phi_R$ , обусловлено коммутацией вентилей инвертора.

Двухсекционное построение статорной обмотки, при котором магнитные оси секций сдвинуты на  $30^\circ$ , позволяет уменьшить неравномерность вращения магнитного поля статора  $\Phi_S$  относительно поля ротора  $\Phi_R$  и тем самым ограничить переменную составляющую результирующего электромагнитного момента синхронной машины, снизить неравномерность вращения ротора, дополнительные потери в роторе.

Общее управление регулятором РПЧ и регулятором возбуждения РВ осуществляется с управляющей вычислительной машины (УВМ).

**Специальные технические требования к работе регулятора преобразователя частоты и регулятора возбуждения в автоматизированном электроприводе турбокомпрессора**

Регуляторы РПЧ и РВ должны выполнять как функции ведомых звеньев в автоматической системе управления электроприводом турбокомпрессора и работать по сигналам высшего приоритета (управляющей машины), так и “ведущие” функции управления, основываясь на данных, полученных от датчиков, и результатах “собственных” расчетов. Функции реализуются на основании специальных технических требований к РПЧ и РВ, самые важные из которых изложены ниже.

1. Величина результирующего электромагнитного момента двигателя зависит, согласно выражению (1) от того, в каком положении поля ротора  $\Phi_R$  относительно поля статора  $\Phi_S$  будет происходить коммутация вентилей инверторов (момент будет максимальным в случае  $60 \leq \alpha_\phi \leq 120^\circ$ ).

Поэтому одним из основных требований к регулятору РПЧ в системе автоматического регулирования электроприводом является определение (в вычислительном блоке) положения ротора а, следовательно, магнитного поля  $\Phi_R$  по значениям напряжения и тока одной из обмоток, и управление преобразователем частоты по результатам расчетов. В начальном неподвижном состоянии положение ротора

определяется интегрированием напряжений, индуцированных в отдельных фазах двигателя после его возбуждения.

2. Регулятор РПЧ (СУИ) должен обеспечить выполнение следующих условий коммутации тиристорных зависимых инверторов И1, И2:

$$\alpha_I + \gamma + \xi_q + \xi_b < 180^\circ \quad (2)$$

и

$$\gamma + \xi_q + \xi_b < 30^\circ \quad (3),$$

где  $\alpha_I$  — угол управления инвертором;  $\gamma$  — угол коммутации тиристорных инвертора;  $\xi_q$  — угол, соответствующий времени выключения тиристора  $t_q$ ;  $\xi_b$  — угол запаса.

Выполнение условия (2) исключает возможность опрокидывания инвертора при достижении максимального момента вентильного двигателя.

Условие (3) определяется наличием двух статорных обмоток, питаемых от собственных преобразователей частоты. Выполнение условия (3) исключает возможность влияния коммутации вентилей одного преобразователя на коммутацию вентилей другого преобразователя.

3. Угол коммутации  $\alpha_I$  зависит от величины коммутируемого тока, поэтому выполнение условий (2) и (3) требует от РПЧ (СУИ) введения коррекции угла управления  $\alpha_I$  в зависимости от величины коммутируемого тока.

4. Режим вентильного двигателя требует от синхронной машины работы с постоянным внутренним магнитным потоком, который определяется расчетным путем по значениям фазного напряжения и тока двигателя в вычислительном блоке регулятора РПЧ. По результатам расчетов в РПЧ регулятор РВ должен осуществлять управление током возбуждения таким образом, чтобы действительный внутренний поток соответствовал заданному значению.

5. Из выражения (1) следует, что если ток возбуждения регулировать таким образом, чтобы внутренний поток двигателя был постоянным, то величина электромагнитного момента  $M_E$  будет прямо пропорциональна магнитному потоку  $\Phi_S$ . Поток  $\Phi_S$  прямо пропорционален току статорной обмотки, который в свою очередь определен током  $I_D$  в промежуточном звене постоянного тока.

Учитывая, что ток  $I_D$  определен разностью средних значений напряжений на выходе сетевого преобразователя  $U_{DS}$  и входе инвертора  $U_{DI}$ :

$$I_D = k_U \cdot (U_{DS} - U_{DI}),$$

а в первом приближении  $U_{DS}$  и  $U_{DI}$  определены выражениями:

$$U_{DS} = U_{DSM} \cdot \cos \alpha_S,$$

$$U_{DI} = U_{DIM} \cdot \cos \alpha_P$$

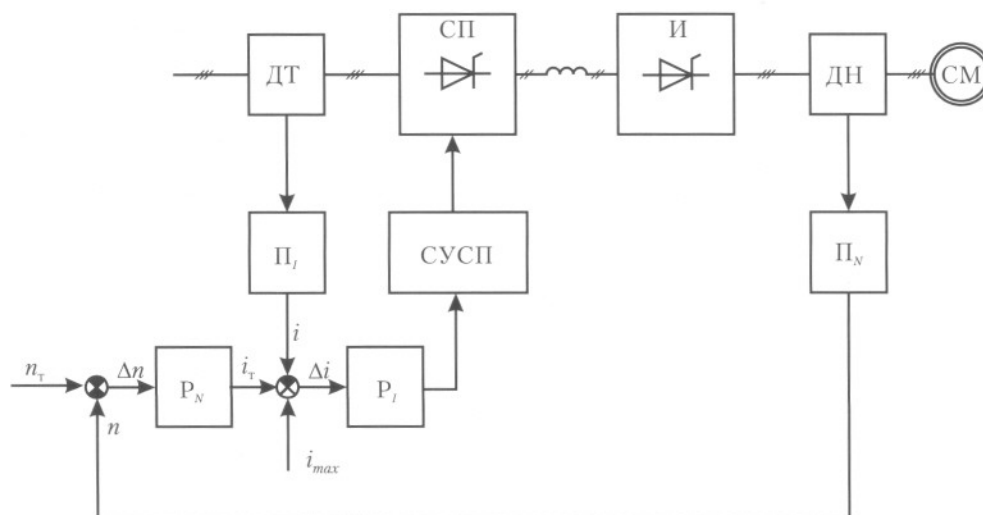


Рис. 2. Блок-схема системы регулирования частоты вращения в автоматизированном электроприводе турбокомпрессора

( $U_{DSM}$  и  $U_{DIM}$  — максимальные средние значения напряжений на выходе сетевого преобразователя и входе инвертора;  $\alpha_S$  — угол управления сетевым преобразователем).

Выражение (1) для момента двигателя в системе ПЧ - СМ трансформируется в следующую зависимость:

$$M_E \approx \Phi_S \approx I_D = k_U \cdot (U_{DSM} \cdot \cos \alpha_S - U_{DIM} \cdot \cos \alpha_L) \quad (4)$$

Максимальное среднее значение напряжения на входе инвертора может быть определено следующим образом:

$$U_{DIM} = 1.35 \cdot U_{FEMN} \cdot n/n_N \quad (5)$$

где  $U_{EFMN}$  — эффективное линейное номинальное напряжение двигателя;  $n$  — текущее значение частоты вращения двигателя;  $n_N$  — номинальное значение частоты вращения двигателя.

Полагая, что величины напряжений  $U_{DSM}$ ,  $U_{EFMN}$  и угол управления  $\alpha_I$  постоянны, выражение (4) с учетом (5) примет окончательный вид:

$$M_E \approx I_D = k_s \cos \alpha_s - k_f n, \quad (6)$$

где  $k_S = k_U \cdot U_{DSM}$ ;  $k_I = k_U \cdot 1.35 \cdot U_{EFMN} \cdot \cos \alpha_I / n_N$ .

Выражение (6) отражает факт, что для поддержания постоянным момента двигателя в системе ПЧ - СМ регулятор РПЧ должен обеспечить изменение угла управления  $\alpha_s$  не только в зависимости от момента, но и от числа оборотов. Непрямым образом этот процесс обеспечивается поддержанием постоянным тока  $I_D$  в промежуточном звене постоянного тока.

Из выражения (6) следует, что для поддержания заданного числа оборотов двигателя регулятор РПЧ должен формировать систему подчиненного регулирования с внутренним контуром регулирования тока и внешним контуром частоты вращения двигателя.

Упрощенная блок-схема системы регулирования показана на рис. 2.

Регулятором частоты вращения  $P_N$  управляет ошибка регулирования  $\Delta n$ , которая является разностью требуемого значения  $n_T$  и действительного значения  $n$  частоты вращения. Частота вращения  $n$  рассчитывается в преобразователе  $\Pi_N$  по частоте напряжения двигателя, измеренного датчиками напряжения (ДН), которые установлены на трехфазном выходе инвертора И. Выходной сигнал регулятора  $P_N$  является требуемым значением тока  $i_T$  для регуляторов тока обоих сетевых преобразователей СП1 и СП2. На выходе регулятора  $P_N$  имеется возможность установить ограничение максимального тока  $i_{max}$ .

Действительное значение тока  $i$  рассчитывается в преобразователе  $P_I$  по данным датчиков тока (ДТ), установленных на трехфазном входе соответствующего сетевого преобразователя. Ошибку регулирования  $\Delta i$  отрабатывает регулятор тока  $P_I$ , выходной сигнал которого поступает на СУСП.

6. Естественная коммутация тиристорov инвертора И может быть осуществлена в системе ПЧ - СМ только при достаточно большой ЭДС вращения синхронной машины, соответствующей частоте вращения не ниже 10 % ее номинального значения. Поэтому для пуска синхронного двигателя в системе ПЧ - СМ до частоты вращения, при которой гарантируется естественная коммутация тиристорov инвертора И, регулятор РПЧ по командам от УВМ должен осуществлять перевод сетевого преобразователя СП из режима выпрямления в инверторный режим.

Перевод СП в инверторный режим определяет снижение входного тока инвертора И до нуля. По истечении временного интервала, необходимого для надежного выключения тиристора инвертора, преобразователь



снова переводиться в режим випрямлення, а ток двигателю проходить через другие открытые, согласно установленному алгоритму коммутации, тиристоры инвертора.

7. В процессе пуска и при регулировании частоты вращения синхронного двигателя коэффициент мощности электропривода (по первой гармонике) относительно питающей сети изменяется в относительно широких пределах.

Экспериментальным путем определено, что в случае детерминированной нагрузки турбокомпрессора реактивная составляющая потребляемого из сети тока почти не изменяется. Поэтому в состав электропривода можно включить нерегулируемую компенсационную станцию.

В случаях, когда нагрузка будет меньше расчетной, регулятор РПЧ (СУИ) должен изменить угол управления инвертором таким образом, чтобы увеличить реактивную мощность, поступающую от синхронного двигателя, и предупредить перекомпенсацию сети от нерегулируемой компенсационной станции.

8. Регуляторы РПЧ и РВ должны обеспечить поддержание рабочей частоты вращения синхронного двигателя без учета нагрузки с точностью не хуже чем  $\pm 2\%$  без корректировки от УВМ.

9. Регуляторы РПЧ и РВ должны обеспечить все необходимые действия (возбуждение, принудительную коммутацию, естественную коммутацию) для разгона электропривода с нагрузкой из состояния покоя до минимальной рабочей частоты вращения (2600 об./мин). При этом пусковые токи двигателя не должны превышать номинального значения.

10. При поступлении команды "Торможение" регулятор РПЧ должен обеспечить инвертирование работы преобразователей СП и И, в результате которого изменяется направление потока энергии. При этом имеет место возвращение энергии вращающейся массы в сеть и электрическое торможение привода.

11. При поступлении команды "Рестарт" (когда привод тормозится, и частота вращения превышает 300 об./мин) регулятор РПЧ должен обеспечить новый разгон на рабочую частоту вращения.

12. При поступлении команды "Проворачивание" регуляторы РПЧ и РВ должны обеспечить все необходимые действия (возбуждение, принудительную коммутацию, естественную коммутацию) для разгона электропривода из состояния покоя до частоты вращения 200 об./мин. Этот режим используется для обточки колец.

13. Регулятор РПЧ анализирует ряд неисправностей, которые подразделяются на две группы.

К первой группе относятся неисправности, при которых регулятор РПЧ должен обеспечить останов электропривода без отключения силовых выключателей.

Ко второй группе относятся неисправности, при которых регулятор РПЧ должен обеспечить останов электропривода и подать команду на отключение силовых выключателей подвода 10 кВ.

14. Регулятор РВ обрабатывает информацию об аварийных ситуациях в цепях управляемого выпрямителя возбуждения УВВ в двух уровнях.

К первому уровню относятся неисправности, в случае которых регулятор РВ должен обеспечить аварийную сигнализацию и подготовку для отключения выпрямителя УВВ. При этом УВВ может еще определенное время работать.

Таким образом обработана ситуация потери вентиляции УВВ.

К второму уровню относятся неисправности, в случае которых регулятор РВ должен обеспечить немедленное отключение выпрямителя УВВ.

В число этих неисправностей входят:

- "сверхток" выпрямителя УВВ;

- суммарная авария, сигнализирующая потерю внутреннего питающего напряжения постоянного тока УВВ, потерю импульсов управления тиристоров УВВ, повреждение предохранителей в блоке тиристоров;

- потеря питающих напряжений для регулятора РВ.

15. Регуляторы РПЧ и РВ должны иметь аппаратные и программные средства для формирования устойчивой диалоговой связи с управляющей вычислительной машиной УВМ, осуществляющей управление электроприводом турбокомпрессора командами высшего приоритета.

Из рассмотренного следует, что эффективность работы автоматизированного электропривода турбокомпрессора во многом зависит не только от технических средств, формирующих регуляторы РПЧ и РВ, но и от корректности математического описания электромагнитных и электромеханических процессов в системе преобразователь частоты - синхронная машина - турбокомпрессор.

При высокой точности и скорости передачи данных от датчиков тока и напряжения, от управляющей вычислительной машины УВМ регуляторы РПЧ и РВ должны проводить анализ, математические расчеты и синтез управляющих команд на уровне, обеспечивающем выполнение требуемых функций электропривода турбокомпрессора.

© Исаков В.Н., Стяжкин В.П., Акинин К.П., Исаков Г.В., Исаков А.Н., Красношапка Н.Д., Демченко Н.А., Беккер М.В., 2003

